灰岩矿山高陡岩质边坡生态修复技术应用研究

慕志盈[1,2],邹仁辉[3*],余何[1,2],韩尚嵩[2],江思义[3],苟晓利[2]

1.桂林理工大学地球科学学院,广西 桂林 541006;
2.贺州学院地质实验室,广西 贺州 542899;
3.广西壮族自治区地质环境监测站,广西 南宁 530029

摘 要:高陡岩质边坡的生态修复是矿山治理的难点和痛点。广西贺州市平桂区田螺山灰岩矿山因边坡高陡、岩体破碎和生态破损的问题,被列为自治区生态修复重点试验区域。将矿山整体边坡划分为3个区域,以C区域作为先行试验区,分析其地质环境和生态特点,提出"工程护坡+基质改良+植被重建"综合修复方案,并对比选用"适宜的种子配方+生态棒+挂网客土基质喷播"技术组合进行试验。结果表明,该技术组合在保证经济性的同时,能够快速提高坡面植被覆盖率。基于3个试验段在坡度及破损程度的差异性,研究优化形成适用于灰岩矿山高陡岩质边坡的技术组合。通过对2种植物的生长高度进行6个月的监测,验证了该技术组合的适应性。鉴于试验的良好成效,该技术已被推广至矿山整体边坡修复。该研究成果可为地质条件类似区域的高陡岩质边坡生态修复提供参考借鉴。

关键词:灰岩矿山;高陡岩质边坡;生态修复;植物种子组合;广西

中图分类号:P642.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2518(2026)04-1015-13 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2026.04.339

引用格式:慕志盈,邹仁辉,余何,等.灰岩矿山高陡岩质边坡生态修复技术应用研究[J].黄金科学技术,2026,34(4):1015-1027.MU Zhiying,ZOU Renhui,YU He,et al.Application Research on Ecological Restoration Technology of High and Steep Rock Slope in Limestone Mine[J].Gold Science and Technology,2026,34(4):1015-1027.

随着我国矿产资源开发力度的持续加大,露天矿山开采形成了众多高陡岩质边坡。该类边坡原有的重力平衡遭到严重破坏,由此引发一系列工程地质与安全方面的问题。例如:不合理和过度开采导致矿山边坡高陡,生态环境恶劣,岩土体稳定性差,容易发生滑坡和崩塌等地质灾害,土壤匮乏、养分含量极低,难以满足植物生长需求(张蒙,2025;江松等,2026);高陡坡度使降水快速流失,保水保肥能力弱,植物难以获取持续的水分和营养供给(张家明等,2019;蒋昆等,2025);恶劣的环境条件使植物成活率低,即使短期植种也容易因环境胁迫退化,难以形成稳定的植被群落(张燕等,2022);施工成本过高,后期维护管理的难度较大,植被生长初期需频繁人工干预,增加维护成本并降低修复效率(杨生巧等,2024)。

国内外学者围绕高陡岩质边坡生态修复领域开展了大量的研究,提出植被混凝土喷播(高云峰等,2019;Cheng et al,2023)、锚杆格构(冯亮勇,2021)、植生带护坡(刘本同等,2004)、V型槽(谢廷勇等,2022)、固土与基质改良(吴和秋等,2025)和多阶梯复绿(于帅,2024)等多种技术方法,并在边坡稳定(Shen et al,2023;Cong,2024)、地貌重塑(王焘等,2024;赵欣等,2025)、先锋植被遴选(宋凤鸣等,2016;张燕等,2022)以及生态治理和养护(Li,

收稿日期:2025-11-19;**修订日期:**2026-05-11

基金项目:贺州市科学研究与计划开发项目"贺州市露采非金属矿山边坡生态修复治理技术研究"(编号:贺科技2024143)、"贺州市地质灾害自动化监测预警模型研究"(编号:贺科技2024141)和"贺州市地质灾害风险防控技术集成研究"(编号:贺科技2024104)联合资助

作者简介:慕志盈(2002—),女,云南保山人,硕士研究生,从事矿山生态修复技术研究工作。E-mail:2125664858@qq.com

***通信作者:**邹仁辉(1983—),男,广西桂林人,硕士,高级工程师,从事地质灾害调查和治理方面的研究工作。E-mail:389491516@qq.com

© Editorial Department of *Gold Science and Technology* (CC BY-NC-ND)

2018；Xu et al，2019；刘伟等，2024；Wu et al，2024）等方面取得了一定的研究成果。然而，技术应用存在显著的地域特征。以德国和瑞士为代表的欧洲发达国家，侧重锚杆格构与植被混凝土喷播的集成应用（Franzaring et al，2024），依托完善的工程标准实现高陡边坡的结构稳定控制，但该方法对高规格材料与精细化施工依赖较强，成本居高不下，难以在发展中国家实现规模化推广。以美国和加拿大等为代表的北美国家，聚焦生态可持续性，推行多阶梯复绿与乡土植物配置技术（Zipper et al，2011），注重生态系统的自然演替，但该方法对气候和土壤条件要求严格，在我国广西贺州喀斯特矿山的复杂地质和湿热气候条件下，植物适应性和修复效果下降。

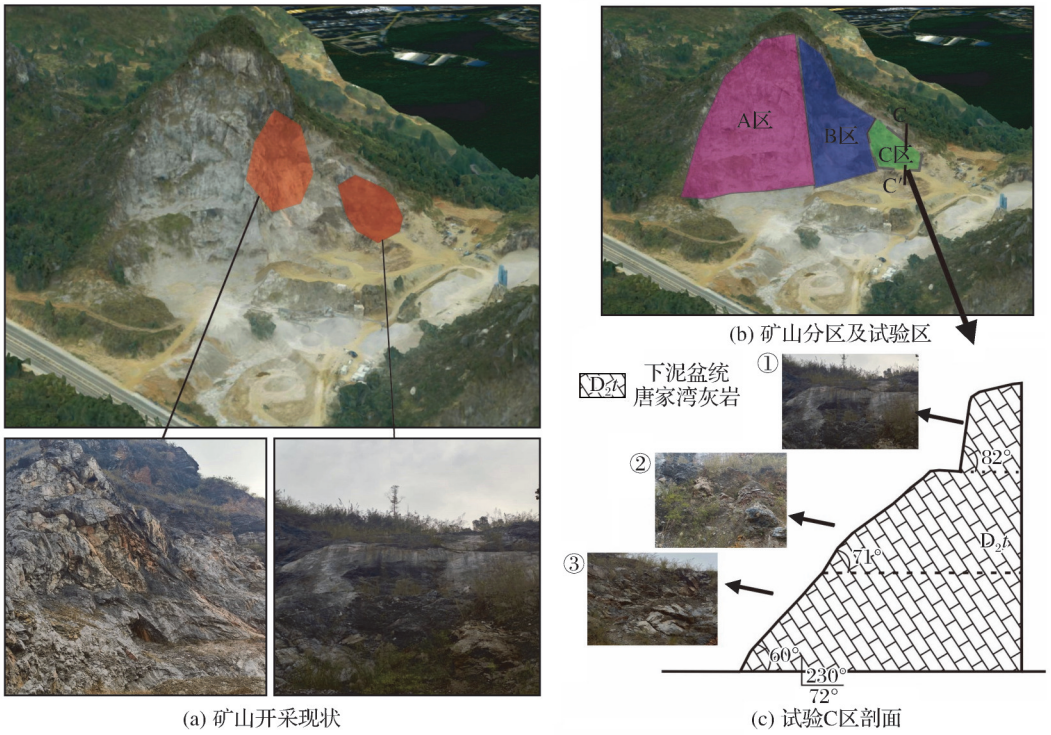
针对上述问题，选择广西贺州市平桂区田螺山灰岩矿山高陡边坡作为研究对象，综合考虑岩体裸露、节理裂隙发育、传统单一复绿手段效果不佳及成本约束等因素，将矿山划分为A、B、C共3个区域，并选取C区域进行试验。在试验过程中，将C区从上到下划分为3个试验段进行边坡生态修复，采用“工程护坡+基质改良+植被重建”的综合修复方案，探索灰岩高陡边坡生态修复中岩体稳定性控制、基质构建和水分养分保持等关键问题，旨在形成低成本、高效率和可持续的修复技术，为同类型矿山边坡生态修复提供参考借鉴。

1 研究对象与生态问题

1.1 研究对象

广西贺州市田螺山灰岩矿山位于贺州市平桂区北环路南侧，行政上隶属黄田镇管辖。矿山距离一级公路50 m，矿山北西面100 m处的将军山有高铁和隧道通过。山体标高为304 m，开采面最高点高程为288.68 m，空间上呈三角形，底宽为250 m，最高点到坡脚顺坡长度为150 m，无分级平台，整体坡度为60°~85°。矿山现状见图1(a)。

田螺山灰岩矿山为历史遗留矿山，被列为广西历史遗留矿山生态修复自治区重大工程，急需进行生态修复。鉴于该边坡的特殊性，传统单一、耗时耗力的修复方案难以适用，需要寻找技术可行、成本低、复绿快和生态修复好的方案。由于整个矿山修复工程经费有限，研究决定采取分区进行试验，



(a) 矿山开采现状　(b) 矿山分区及试验区　(c) 试验C区剖面

图1 广西贺州市田螺山灰岩矿山现状

Fig. 1 Current situation of the Tianluoshan limestone mine in Hezhou City, Guangxi

再依据修复效果和成本逐步推广至整个矿山。将田螺山灰岩矿山划分为A、B、C共3个区域,综合考虑其地质特征,选择C区域作为试验区域[图1(b)、1(c)]。该区域的边坡角度、岩体结构和稳定性与A、B区域一致;相较A、B区域,C区高度较低,便于修复材料的运输和现场实施。该区域的试验可行性得到验证后,便可将修复技术推广至整个矿山边坡。试验区面积约为500 m^2,从上到下划分为3个试验段,标记为①、②和③。

(1)地质环境概况

根据广西地质构造分区,田螺山灰岩矿山地处华南板块南华活动带之桂中—桂东北褶皱系大瑶山隆起,构造发育较复杂。矿区地层岩性为下泥盆统唐家湾组(D_2t),以灰—灰黑色灰岩和白云岩为主,节理裂隙发育,岩质坚硬。矿山属峰林谷地地貌区,峰坡陡峻直立,谷地开阔,地表水和地下水相互转化频繁,溶洞、洼地和落水洞发育。平桂区属亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛,多年平均气温为19.9 ℃,矿区破损面朝向由北向南,平均日照时长为12 h,雨季为4月上旬至9月下旬,降雨量约占全年总量的70%,其中,4月份降雨量最大,多在200 mm以上。矿区内未见矿坑涌水,地下水受大气降水补给,地下水对矿床开采影响小。广西贺州市平桂区地质环境图见图2。

(2)生态环境概况

通过开展实地调查并查阅文献资料,该矿山山体覆盖土层较薄,有机质含量低(大于2%),盐基饱和度低,富含铁、铝氧化物,pH值约为7.2。矿区现存植被中,鬼针草和茅草等草本为自然恢复先锋物种,龙须藤和蛇藤等为主要攀援植物,构树和红背山麻科等为优势树种,在岩质边坡植被群落中占主导(图3)。

1.2 矿区生态问题

露天开采矿区坡面岩石裸露、岩体破碎,导致生态环境恶化,原有植被严重破坏,仅存以茅草为主的稀疏植被。矿山开采改变了原有地形和植被景观,与周边农田及天然绿地景观极不协调(图4)。目前,矿区土地损毁类型以压占和挖损为主,其中压占对原有土壤影响较大,表现为土壤普遍呈酸性、有机质缺乏,肥力较低;部分山体和山脚分布覆盖的土层较薄,厚度基本为0~20 cm。

2 生态修复技术对比及选择

2.1 生态修复技术对比

解决高陡边坡生态修复的关键在于,清理坡面松散岩体,重建表层土层,实现快速复绿。目前,对于高陡岩质边坡的工程护坡技术主要有厚层基材喷播技术(龙占涛等,2023;李嘉宝等,2025)、生态袋绿化(寿立永等,2024)、挂网客土喷播技术(白建宇,2022;王焘等,2024)、植生孔/植生盆修复技术(寿立永等,2024)、喷砼飘台技术(赵金召等,2020)和台阶爆破削坡复绿(高云峰等,2019)。根据试验区的地质环境条件、施工条件及实地调查结果,针对试验区边坡治理形式可供选择的技术如表1所示。

2.2 试验区采取的生态修复技术

针对广西贺州市田螺山灰岩矿山临近高铁路线、边坡陡峻直立和基岩裸露的特点,综合对比3种高陡岩质边坡治理技术,最终选用“生态棒+挂网客土喷播”技术。该技术不需要大规模爆破削坡,施工扰动小,不影响临近高铁安全运行,且适用灰岩高陡岩质边坡,可快速复绿并防止水土流失。相比之下,方案二和方案三均涉及爆破或机械削坡,施工扰动大、安全风险高,且后期养护需求较高。方案一对后期养护需求较低,更适用于试验区复杂地质和湿热条件下的长期稳定复绿要求。在此基础上,结合矿山地质环境条件,补充适宜的种子配方作为辅助措施,形成了“适宜的种子配方+生态棒+挂网客土喷播”技术组合(图5)。

在边坡生态修复中,植物种子配方决定了在陡立、贫瘠和水热胁迫条件下修复工程的成活率和长期稳定性。针对贺州市田螺山灰岩矿山的高陡岩质边坡,“适宜的种子配方”是依据矿山地质环境条件制定。狗牙根、黑麦草、宽叶草、多花木兰、木豆和波斯菊等植物是广西地区常用的先锋植物(杨家鸿,2020;莫孙庆等,2022;杨生巧等,2024),具有耐贫瘠、抗逆性强和根系发达等特点,兼具快速复绿、固土护坡和土壤改良作用。贺州市属亚热带季风气候,雨量充沛,夏季高温高湿,冬季温和少雨,结合当地气候和边坡基质特点,合理搭配草本和豆科植物,科学制定种子配方(表2),以提升植物成活率。

在边坡生态修复中,合理控制费用对实现技术可行、成本低、复绿快和效果好的目标至关重要。

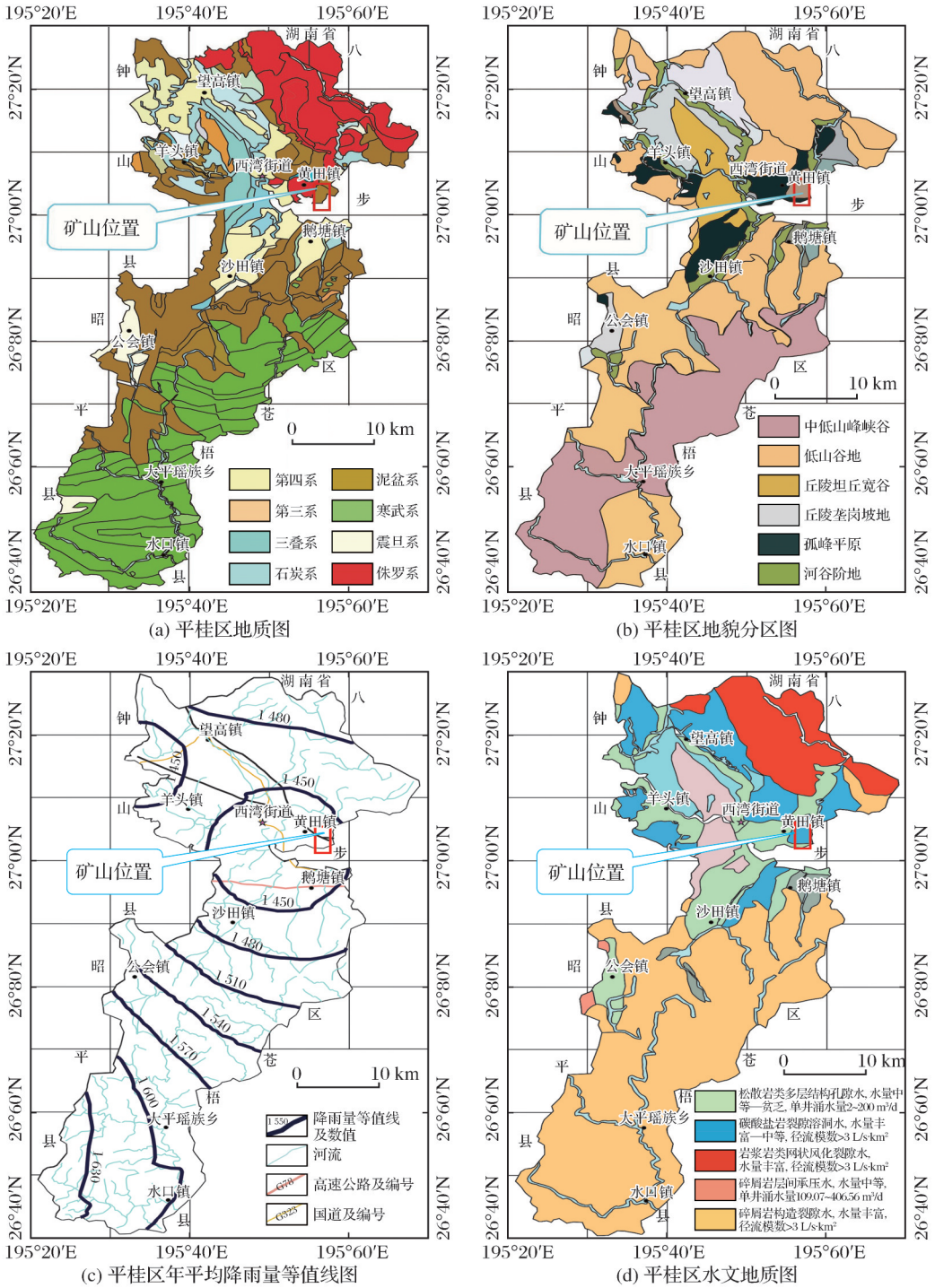


图2　广西贺州市平桂区地质环境图

Fig. 2　Geological environment maps of Pinggui district in Hezhou City, Guangxi

以试验区C(面积约为500 m²)为例,核心材料费用占70%以上(表3),运输和人工费用约占30%。施工阶段投入4人、工期10 d(日均300元/人),后期养护2人、周期2个月。相较传统方案,采用“适宜的种子配方+生态棒+挂网客土喷播”技术具有显著成本优势:初期单位成本为50~80元/m²,材料匹配精准,避免过度工程化;乡土植物存活率大于等于80%,仅需前期2个月养护,长期养护成本降低约



(a)鬼针草(草本植物);(b)茅草(草本植物);(c)银合欢(乔木);(d)苎麻(草本植物);(e)车桑子(灌木);(f)龙须藤(攀援植物)

图3　田螺山灰岩矿山分布的植物类型

Fig. 3　Plant types distributed in the Tianluoshan limestone mine



(a) 土地占用及破坏　(b) 边坡岩体破损　(c) 破山与周边景观对比

图4　田螺山灰岩矿山存在的生态问题

Fig. 4　Ecological problems existing in the Tianluoshan limestone mine

50%。按矿山总面积12万 m^2估算,总投资约为500万元,整体成本较为经济。此外,耕植土来源于距试验区7 km的姑婆山大道储存区,短距运输降低了成本和材料损耗。

3　生态修复试验及其效果

3.1　试验过程

试验区采用“工程护坡+基质改良+植被重建”的综合修复方案,具体技术组合为“适宜的种子配方+生态棒+挂网客土喷播”。边坡生态修复流程包括:清理坡面松散危岩与杂草、①试验段挂网和生态棒固定、客土基质喷播、表面覆盖植被毯和无纺布以及养护管理。施工流程如图6所示。

(1)坡面清理:采用人工自上而下清除坡面杂草、浮土及松散危岩,以增强基材与坡面的黏结性。

(2)试验段挂网和生态棒固定:采用电锤垂直

表1 高陡岩质边坡治理技术对比

Table 1 Comparison of treatment technology of high and steep rock slope

序号	治理修复内容	主要作用机制	优点	缺点
方案一	生态棒+挂网客土喷播	在坡面上铺设镀锌铁丝网,用锚杆固定,并将土壤、种子、肥料和保水剂混合加入水中,利用专业设备将其喷射到坡面上	适用性广,能快速复绿,有效防止水土流失	初期成本较高,后期需要定期维护
方案二	台阶爆破削坡+植生孔复绿	采取人工爆破及机械等方法削坡,针对坡度较大的,分台阶削坡和降低边坡坡度,在露天开采平台钻孔放入土壤和植物	稳定性好、耐久性强;根据地形灵活布置	对后期养护具有较高要求,需要人工定期巡视管理
方案三	削坡蓄坡+厚层基材喷播技术	通过机械或爆破等方式降低边坡坡度,在底部堆积土石并分层压实,填补山体缺口,后将防腐蚀性较强的厚层基材与种子混合后进行喷播	能快速恢复植被,具有一定的抗侵蚀性	前期投入成本相对较高,施工技术要求较为严格,需要长期养护

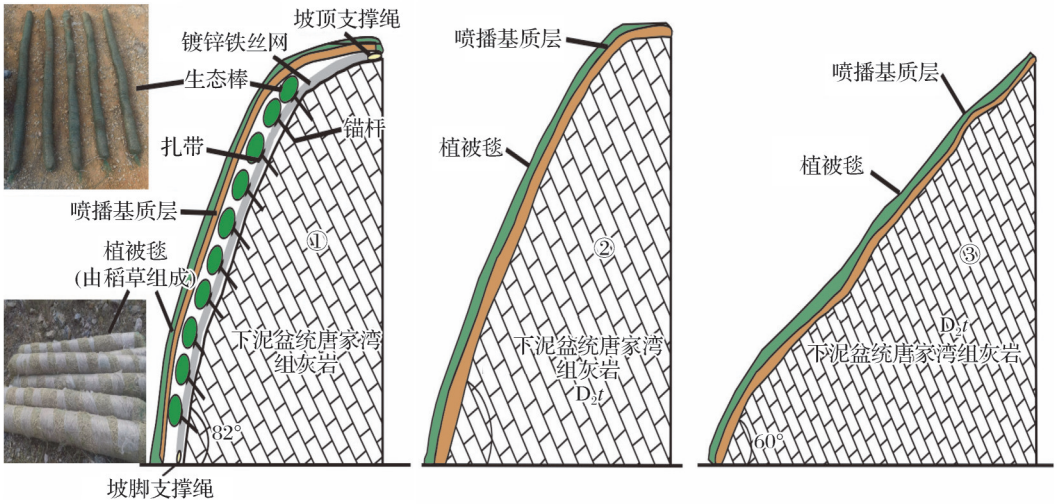


图5 田螺山灰岩矿山高陡岩质边坡生态修复技术组合

Fig. 5 Ecological restoration technology combination of high and steep rock slope in the Tianluoshan limestone mine

表2 各区域修复形式和种子配方

Table 2 Restoration forms and seed formulations for each region

区域	修复形式	工艺要点	种子配方
①	生态棒+挂网客土喷播(10 cm)	挂镀锌网+锚杆固定生态棒	狗牙根3 g、宽叶草5 g、糖蜜草3 g、黑麦草3 g、猪屎豆10 g、银合欢6 g、多花木兰15 g、木豆7 g、车桑子5 g、波斯菊0.5 g,合计57.5 g
②	种子层喷播(2~3 cm)	无挂网,湿法喷播	同上
③	客土喷播(5~6 cm)	无挂网,湿法喷播	同上

坡面钻孔。主锚杆采用φ12螺纹钢,副锚杆采用φ8螺纹钢,长度为30 cm,孔深为20 cm,外露10 cm,间排距为2 m×2 m,入岩角度为95°~100°。风化严重区域视情况加密锚杆。坡面铺设14#勾花镀锌铁丝网(网目为5 cm×5 cm),自上而下铺设,网片间及其与锚杆连接处均使用18#镀锌铁丝绑扎。沿等高线方向布设生态棒,并用扎带和锚杆固定。

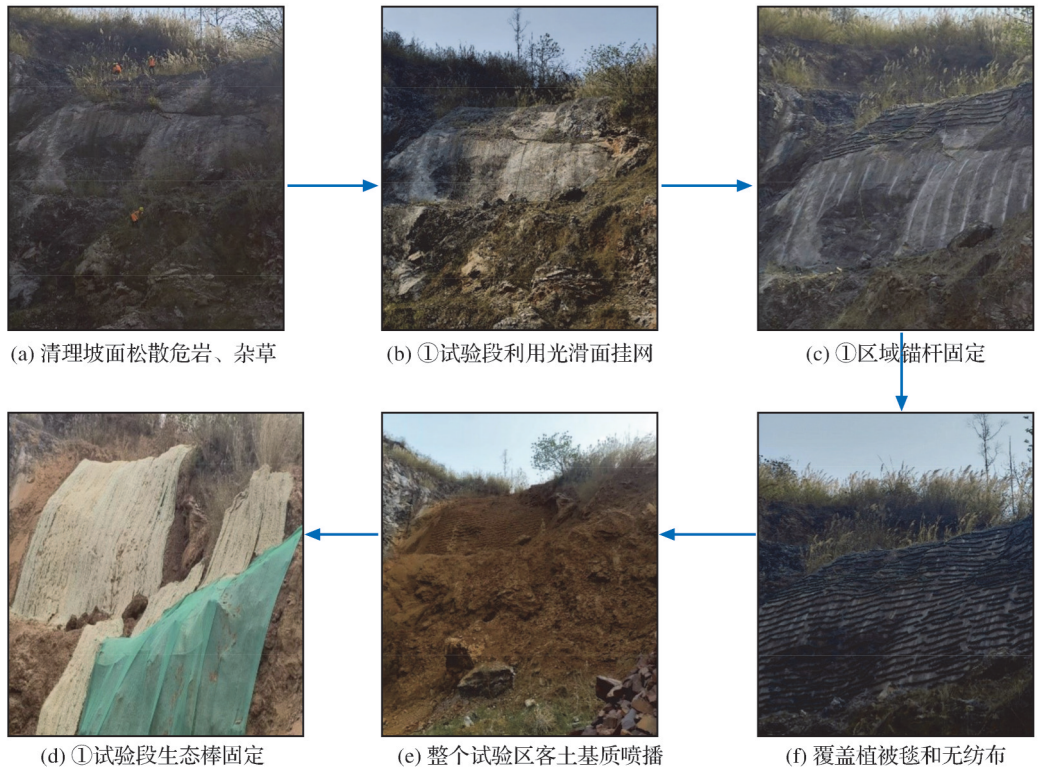
(3)客土基质喷播:基材由耕植土(砂粒小于等于5%,粒径小于等于5 mm,含水率小于等于20%,pH值为6.5~7.5)、植物纤维、水泥、腐殖质、长效复合肥(N∶P∶K=15∶15∶15)、保水剂、绿化添加剂和黏结剂组成。按比例搅拌均匀后,自上而下对试验段进行喷播。采用双层湿喷工艺:先喷8 cm基层,4~8 h后再喷2 cm含草种绿化层。

(4)表面覆盖植被毯和无纺布:喷播后48 h内,在试验段表面覆盖植被毯和无纺布,保温保湿,防止种

表3　边坡修复核心材料费用

Table 3　Cost of repairing core materials for slope

材料名称	规格要求	用量	单价/元	合计/元
镀锌铁丝网	14#镀锌勾花铁丝网,网孔 50 mm×50 mm	220 m^2	15~18	3 300~3 960
生态棒	长度为1.8 m	130 根	30~45	3 900~5 850
锚杆	钢筋型号为Φ12HRB400和Φ8HRB400,单根锚钉长度为30 cm	100 根	12~30	1 200~3 000
扎带	尼龙材质:宽度为10 mm,长度为20 cm	600 根	0.7~1.1	420~660
植被毯	稻草组成	220 m^2	10~18	2 200~3 960
保水剂、黏合剂		10 kg	15~30	150~300
合计				11 170~17 730



(a) 清理坡面松散危岩、杂草　(b) ①试验段利用光滑面挂网　(c) ①区域锚杆固定

(d) ①试验段生态棒固定　(e) 整个试验区客土基质喷播　(f) 覆盖植被毯和无纺布

图6　试验区施工流程

Fig. 6　Construction process of experimental area

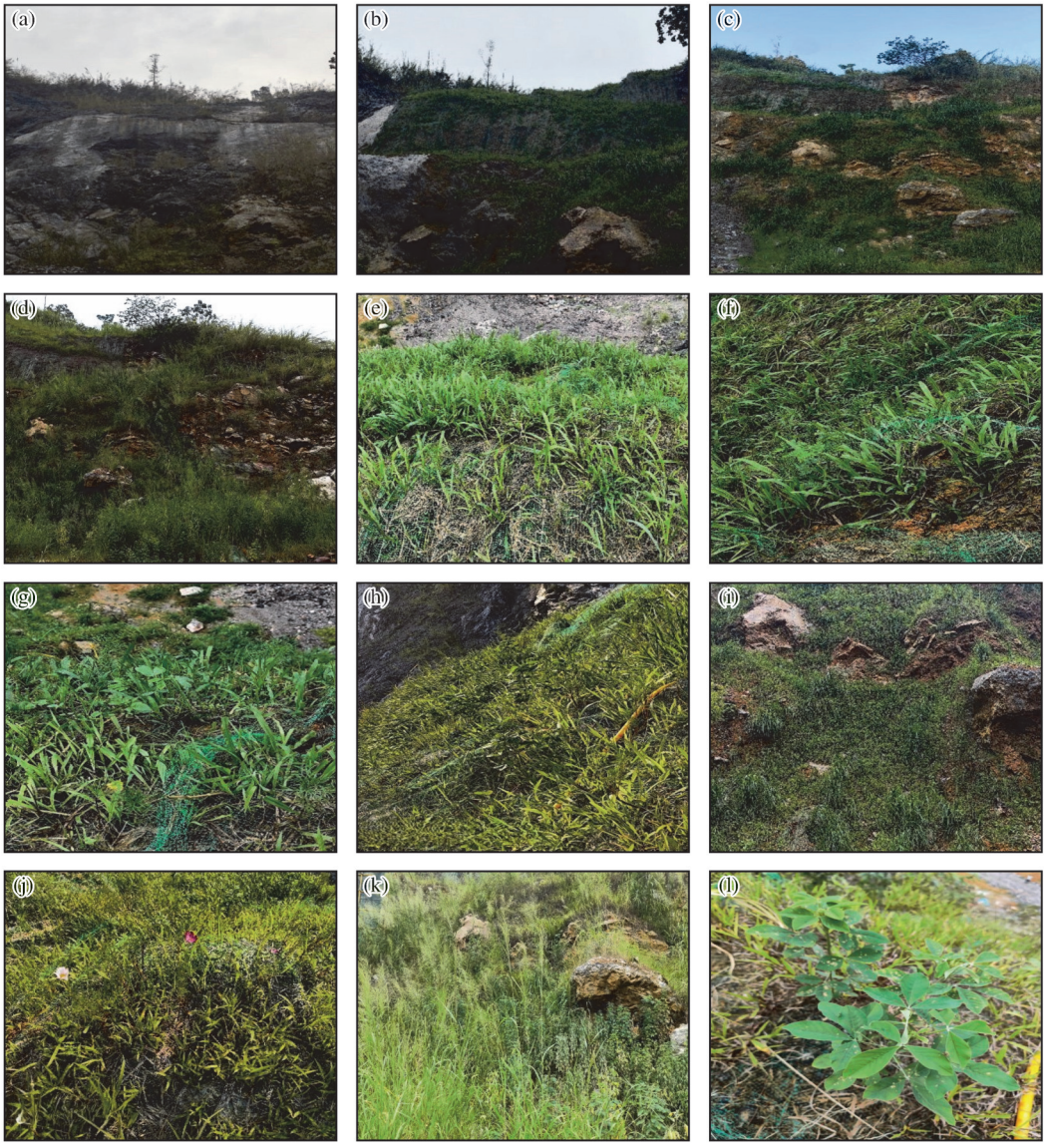
子被风吹走或被鸟类啄食,提高出芽率和成活率。

(5)养护管理:前期精细化养护2个月,包括定期浇水、施肥,人工巡护、补栽枯死或未出芽植物,并对病虫害进行诊断和针对性防治,后期无需人工养护,有效降低养护剂人力成本。

3.2　修复成效

在田螺山灰岩矿山试验区采用"适宜的种子配方+生态棒+挂网客土基质喷播"技术后,经过6个月观测,边坡植被覆盖率显著提升。除前2个月精细养护之外,后期全程未施肥。修复前,①试验段坡面几乎无植被覆盖,②、③试验段仅有零星杂草;修复2个月后,植被覆盖率达40%,修复4个月后提升至50%以上,修复6个月后达到80%。实地调查结果显示,该技术对广西贺州市灰岩矿山生态修复具有较高的适用性。

本修复项目于2025年3月17日启动,3月27日完工,修复过程如图7所示。其中,首次观测(5月24日,气温为17~19 ℃,阴天,湿度较高)发现,①试验段内狗牙根、宽叶草、黑麦草、猪屎豆、银合欢和波斯菊等草本植物逐渐萌发,②、③试验段植被覆



(a)修复前;(b)边坡整体生长情况(2个月后);(c)边坡整体生长情况(4个月后);(d)边坡整体生长情况(6个月);(e~g)边坡植被生长细节图(2个月后);(h~j)边坡植被生长细节图(4个月后);(k~l)边坡植被生长细节图(6个月后)

图7　贺州市田螺山灰岩矿山试验区边坡生态修复过程

Fig. 7　Ecological restoration process of slope in Tianluoshan limestone mine experimental zone, Hezhou City

盖率较修复前显著提升;第二次观测(7月5日,多云转晴,26~37 ℃,湿度较低)发现,受高温少雨影响,①试验段部分植被出现干枯和发黄,但整体植被覆盖率仍呈上升趋势;第三次观测(10月14日,多云,23~31 ℃,湿度较高)发现,各试验段植被高度明显增加,覆盖率进一步提高,其中猪屎豆、黑麦草和茅草生长旺盛。修复后,边坡水土保持能力显著增强,土层厚度增加,基质未见冲刷沟,与周边林地景观逐渐融合,视觉突兀感减弱;边坡稳定性显著改善,未出现裂隙或崩塌等现象。

通过对②试验段的茅草和猪屎豆2种典型植物6个月的生长高度进行观测(表4),绘制其生长动态折线图(图8),分析其生长速度变化特征。

为进一步验证植物生长与当地环境因子的内在关联,选取广西贺州市2025年3~10月(植被主要生长期)气象数据,包括月平均气温和月降雨量,数据来源于当地气象站实测,具体见表5。

采用皮尔逊相关系数分析法,分析温度、降雨量

表4　茅草和猪屎豆6个月的生长高度和月生长量数据

Table 4　Six-month growth height and monthly growth data of thatch and pig manure beans

观测时间	茅草生长高度/cm	猪屎豆生长高度/cm	茅草月生长高度/cm	猪屎豆月生长量/cm
3月	0	0	0	0
4月	6.3	5.5	6.3	5.5
5月	14.2	10.5	7.9	5.0
6月	45.2	34.6	31	24.1
7月	75.6	62.3	30.4	27.7
8月	98.2	85.8	22.6	23.5
9月	118.4	112.4	20.2	26.6
10月	156.8	132.6	38.4	20.2

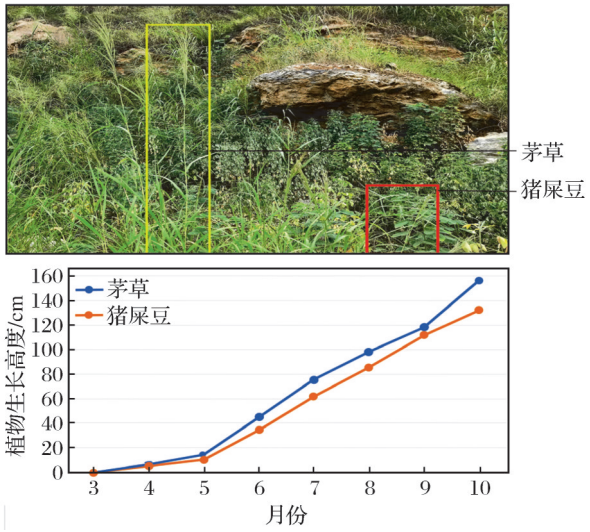


图8　田螺山灰岩②试验段茅草和猪屎豆生长趋势

Fig. 8　Growth trends of thatch and pig manure beans in the Tianluoshan limestone ② test section

与植物生长效率的线性相关程度,计算公式如下:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{7}$$

式中:r为相关系数($-1\leqslant|r|\leqslant1$),$|r|>0.7$为强相关,$0.5<|r|\leqslant0.7$为中等相关,$|r|\leqslant0.5$为弱相关;x_i、y_i为变量实测值;$\bar{x}$、$\bar{y}$为变量均值;n为样本数。

茅草和猪屎豆相关性计算结果见表6。

由表4和表6可知,茅草和猪屎豆的生长效率与温度、降雨量呈正相关关系。水热条件是影响灰岩高陡边坡植物生长的因素,符合亚热带季风气候植被生长规律。从生长阶段来看,修复初期(前3个月)2种植物生长速度相对平缓,株高增长幅度较小;中期(6~8月),随着坡面环境改善及根系逐步扎根,2种植物进入快速生长期,株高显著增长;后期(9~10月),由于受高温和降雨等环境的影响,生长速度有所放缓,但仍保持稳定增长。整体而言,茅草和猪屎豆生长过程呈现"缓慢适应—快速增长—稳定延续"的阶段性特征,验证了"适宜的种子配方+生态棒+挂网客土喷播"技术组合的生态适应性。

表5　广西贺州市2025年3~10月气象数据

Table 5　Meteorological data for Hezhou City, Guangxi from March to October 2025

观测时间	平均气温/℃	月降雨量/mm
3月	17.5	15.3
4月	23.5	0
5月	24.5	89.1
6月	28.5	969.8
7月	30	646.6
8月	29.5	320
9月	27.5	180
10月	23	65

表6　茅草和猪屎豆相关性计算结果

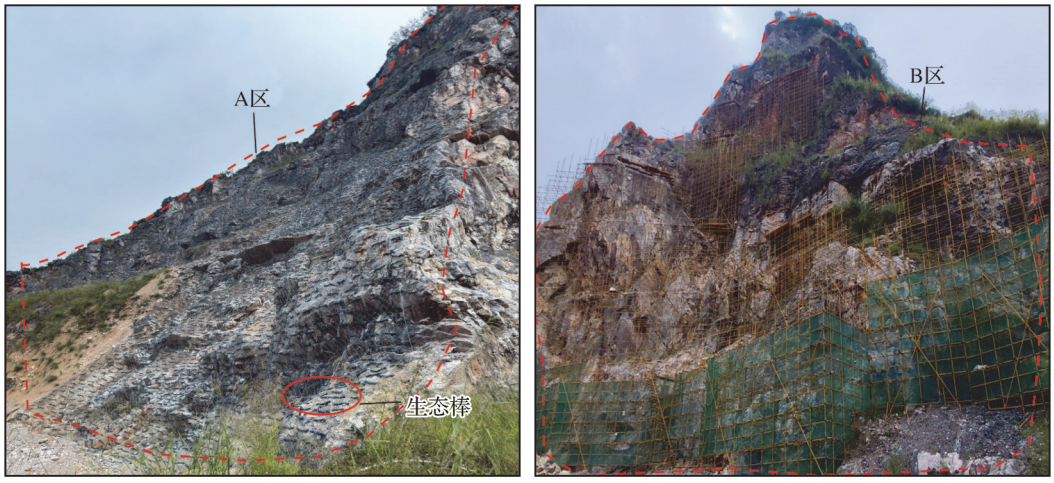
Table 6　Correlation calculation results of thatch and pig manure beans

植物名称	因子	r(相关系数)	P值	结论
茅草	平均气温	0.78	<0.05	强相关
	月降雨量	0.82	<0.01	强相关
猪屎豆	平均气温	0.72	<0.05	强相关
	月降雨量	0.75	<0.05	强相关

以上高陡边坡生态修复成效表明,该技术组合具有技术可行、成本低、复绿快和修复好等特点。鉴于此,重大工程项目组将该技术组合推广应用于整个矿山生态修复(图9),其中A区已完成生态棒铺设,B区已实施锚杆固定。本次研究成果和技术组合可为地质条件类似的高陡岩质边坡生态修复提供新的思路和参考。

4　结论

本研究选择广西贺州市田螺山灰岩矿山作为研究对象,针对其基岩裸露、坡度大和生态破损等特点,采用分区试验,提出"工程护坡—基质改良—



(a) A区已完成生态棒铺设　　(b) B区已实施锚杆固定

图9　田螺山灰岩矿山推广应用“适宜的种子配方+生态棒+挂网客土喷播”生态修复技术组合

Fig. 9　Ecological restoration technology combination of “suitable seed formula, ecological sticks, netting and hydroseeding” is popularized and applied in the Tianluoshan limestone mine

植被重建”的综合修复方案，取得以下主要结论：

（1）根据3个试验段在坡度与破损程度上的差异，设计差异化的修复技术和喷播厚度，提出了“适宜的种子配方+生态棒+挂网客土喷播”的技术组合。

（2）试验表明，该技术组合能够快速、经济地提升坡面植被覆盖率，具有良好的生态效益。

（3）通过对2种植物进行6个月的观测及相关系数分析，验证了该技术的可行性和适应性，已推广至整个田螺山矿山的生态修复，该研究成果可为地质条件类似的高陡边坡生态修复提供参考借鉴。

参考文献（References）：

Cheng X Y, Yang R M, Han Y, 2023. Construction method for ecological protection of stone side slopes using composite vegetation concrete[J]. Scientific Reports, 13: 16871.

Cong Z C, 2024. Study on the impact of mining on ecological environment and the core of ecological restoration in mining areas[J]. Academic Journal of Environment & Earth Science, 6(3): 060304.

Franzaring J, Kamradt A, Büttner P, et al, 2024. Establishing grassland mixtures on mine wastes—a two-year mesocosm study[J]. International Journal of Phytoremediation, 26(12): 1942-1951.

Li W, 2018. Study on ecological restoration and landscape design strategies of abandoned mines[J]. Journal of Plant and Environmental Research, 8: 1805.

Shen Y F, Li Q, Pei X J, et al, 2023. Ecological restoration of engineering slopes in China: a review[J]. Sustainability, 15(6): 5354.

Wu X J, Xing C, Ju Q G, et al, 2024. Research progress in mining ecological restoration technology[J]. Journal of Industrial Safety, 1(1): 100004.

Xu D M, Zhan C L, Liu H X, et al, 2019. A critical review on environmental implications, recycling strategies, and ecological remediation for mine tailings[J]. Environmental Science and Pollution Research, 26(35): 35657-35669.

Zipper C E, Burger J A, McGrath J M, et al, 2011. Forest restoration potentials of coal-mined lands in the eastern United States[J]. Journal of Environmental Quality, 40(5): 1567-1577.

白建宇，2022. 高陡岩质边坡的生态修复技术[J]. 建筑技术开发，49(12)：104-106. Bai Jianyu, 2022. Ecological restoration technology of high and steep rock slope[J]. Building Technique Development, 49(12): 104-106.

冯亮勇，2021. 关于高陡岩质边坡矿山地质环境治理工程的分析[J]. 世界有色金属，(20)：171-172. Feng Liangyong, 2021. Analysis on mine geological environment treatment project of high and steep rock slope[J]. World Nonferrous Metals, (20): 171-172.

高云峰，徐友宁，陈华清，2019. 露天矿硬岩边坡复绿技术现状及存在问题[J]. 中国矿业，28(2)：60-65. Gao Yunfeng, Xu Youning, Chen Huaqing, 2019. Situation and ex-

isting problems of vegetation restoration technology of hard rock slope in open-pit mining area[J]. China Mining Magazine, 28(2): 60-65.

江松,李小普,毛晶,等,2026. Rhino-FLAC^{3D}耦合下的某露天矿高陡岩质边坡稳定性分析[J]. 黄金科学技术,34(3): 674-686. Jiang Song, Li Xiaopu, Mao Jing, et al, 2026. Stability analysis of high-steep rock slope in an open-pit mine using Rhino-FLAC^{3D}coupling[J]. Gold Science and Technology, 34(3): 674-686.

蒋昆,陈禹宏,2025. 小型废弃矿山高陡边坡生态修复技术探讨[J]. 世界有色金属,(1): 229-231. Jiang Kun, Chen Yuhong, 2025. Exploration of ecological restoration technology for high and steep slopes in small abandoned mines[J]. World Nonferrous Metals, (1): 229-231.

李嘉宝,刘云亮,张旭,等,2025. 边坡生态修复技术研究[J]. 人民黄河,47(增刊1): 90-91. Li Jiabao, Liu Yunliang, Zhang Xu, et al, 2025. Study on ecological restoration technology of slope[J]. Yellow River, 47(Suppl.1): 90-91.

刘本同,钱华,何志华,等,2004. 我国岩石边坡植被修复技术现状和展望[J]. 浙江林业科技,24(3): 47-54. Liu Bentong, Qian Hua, He Zhihua, et al, 2004. Current situation and prospect of restoration technique of plant on rocky slope[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 24(3): 47-54.

刘伟,闫晓宇,刘庆朋,等,2024. 根土复合体增强矿区排土场边坡抗剪强度试验研究[J]. 黄金科学技术,32(5): 871-881. Liu Wei, Yan Xiaoyu, Liu Qingpeng, et al, 2024. Experimental study on shear strength of dump slope in mining area enhanced by root-soil composite[J]. Gold Science and Technology, 32(5): 871-881.

龙占涛,孟婉荣,2023. 废弃矿山高陡边坡生态修复技术[J]. 中国金属通报,(13): 231-233. Long Zhantao, Meng Wanrong, 2023. Ecological restoration technology of high and steep slopes in abandoned mines[J]. China Metal Bulletin, (13): 231-233.

莫孙庆,寇景铮,皮桥辉,等,2022. 广西某石灰石矿山高陡边坡生态复绿设计及施工[J]. 矿山工程,(4): 371-381. Mo Sunqing, Kou Jingzheng, Pi Qiaohui, et al, 2022. Design and construction of ecological restoration of high and steep slopes in a limestone mine in Guangxi[J]. Mine Engineering, (4): 371-381.

寿立永,吴凯,王焘,等,2024. 石灰岩矿山高陡边坡生态修复技术方法[J]. 中国非金属矿工业导刊,(6): 81-85. Shou Liyong, Wu Kai, Wang Tao, et al, 2024. Ecological restoration techniques for steep slopes in limestone mines[J]. China Non-metallic Mining Industry, (6): 81-85.

宋凤鸣,刘建华,钱瑭璜,等,2016. 8种乡土植物在边坡植被恢复工程中的应用[J]. 中国水土保持科学(中英文),14(4): 134-141. Song Fengming, Liu Jianhua, Qian Tanghuang, et al, 2016. Application of 8 indigenous plants in slope revegetation engineering[J]. Science of Soil and Water Conservation, 14(4): 134-141.

王焘,妙超,郑海军,等,2024. 基于地貌重塑方案的露天石灰岩矿山生态修复技术应用:以蓝田县小寨石灰岩矿生态修复为例[J]. 中国非金属矿工业导刊,(5): 76-80. Wang Tao, Miao Chao, Zheng Haijun, et al, 2024. Ecological restoration technology and application of open-pit limestone mine based on geomorphological remodeling scheme: take the ecological restoration of Xiaozhai limestone mine in Lantian County as an example[J]. China Non-metallic Mining Industry, (5): 76-80.

吴和秋,赵龙,杨雨荷,等,2025. 基于固土的高陡岩质边坡植被重建技术应用现状与展望[J]. 中国水土保持科学(中英文),23(4): 12-22. Wu Heqiu, Zhao Long, Yang Yuhe, et al, 2025. Application status and prospects of vegetation restoration technology based on soil consolidation for high and steep rocky slope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 23(4): 12-22.

谢廷勇,廖建雄,刘芳,等,2022. 典型废弃采石场边坡生态修复及综合利用技术研究[J]. 矿产与地质,36(5): 1041-1046. Xie Tingyong, Liao Jianxiong, Liu Fang, et al, 2022. Study on ecological restoration and comprehensive utilization technology of typical abandoned quarry slope[J]. Mineral Resources and Geology, 36(5): 1041-1046.

杨家鸿,2020. 广西平桂大理石矿区植被复绿水保措施初探[J]. 亚热带水土保持,32(1): 44-46, 56. Yang Jiahong, 2020. Initial analysis on the soil conservation measures for the vegetation recovery at marble mine of Pinggui County of Guangxi Province[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 32(1): 44-46, 56.

杨生巧,杨蒙岭,贺明星,等,2024. 矿山高陡岩石边坡生态修复技术研究进展[J]. 环境生态学,6(2): 95-100, 152. Yang Shengqiao, Yang Mengling, He Mingxing, et al, 2024. Review of researches in ecological restoration of high and steep rock slope of mine[J]. Environmental Ecology, 6(2): 95-100, 152.

于帅,2024. 基于层次分析—模糊综合模型的露天矿山微地形生态修复技术评价研究[J]. 中国矿业,33(11): 39-48. Yu Shuai, 2024. Evaluation of micro-topography ecological restoration technology for open-pit mines based on

analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation [J].China Mining Magazine,33(11):39-48.

张家明,陈积普,杨继清,等,2019.中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J].水土保持学报,33(5):1-7.Zhang Jiaming, Chen Jipu, Yang Jiqing, et al, 2019.Advances in biological protection of rock slopes in China[J]. Journal of Soil and Water Conservation,33(5):1-7.

张蒙,2025.复杂地质条件下露天矿开采边坡防治技术集成与应用[J].有色金属设计,52(3):27-31.Zhang Meng, 2025.Integration and application of slope prevention technology for open-pit mining under complex geological conditions[J].Nonferrous Metals Design,52(3):27-31.

张燕,陈洪年,王小兵,等,2022.华北地区石灰岩质高陡边坡修复先锋植物遴选[J].中国地质灾害与防治学报,33(5):109-118.Zhang Yan, Chen Hongnian, Wang Xiaobing, et al, 2022.Selection of pioneer plants for repairing limestone high and steep slopes in North China[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,33(5):109-118.

赵金召,李予红,席正,等,2020.露天高陡岩质边坡生态修复技术的探讨[J].绿色科技,22(22):223-225.Zhao Jinzhao, Li Yuhong, Xi Zheng, et al, 2020.Discussion on ecological restoration technology of open-pit high and steep rock slope[J].Journal of Green Science and Technology, 22(22):223-225.

赵欣,王佟,王伟超,等,2025.青海木里矿区四号井生态地质修复与效果[J].煤田地质与勘探,53(4):119-127.Zhao Xin, Wang Tong, Wang Weichao, et al, 2025.Measures and effects of eco-geological restoration in well No.4 in the Muli mining area, Qinghai Province, China[J].Coal Geology & Exploration,53(4):119-127.

Application Research on Ecological Restoration Technology of High and Steep Rock Slope in Limestone Mine

MU Zhiying[1,2], ZOU Renhui[3], YU He[1,2], HAN Shangsong[2], JIANG Siyi[3], GOU Xiaoli[2]

1.*School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin* 541006, *Guangxi, China*;

2.*Hezhou University Geological Laboratory, Hezhou* 542899, *Guangxi, China*;

3.*Geological Environment Monitoring Station of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning* 530029, *Guangxi, China*

Abstract: Limestone mining frequently results in the formation of high and steep rock slopes characterized by poor stability and challenging conditions for vegetation restoration, primarily due to unsustainable or excessive exploitation practices. The ecological rehabilitation of such mines has consistently posed significant challenges. Traditional regreening techniques, which often rely on singular approaches, have proven inadequate in addressing the adverse environmental conditions and the complexities of soil and water conservation. Consequently, there is substantial practical and applicative value in developing an effective and scalable comprehensive restoration strategy. The Tianluoshan limestone mine, located in the Pinggui district of Hezhou City, Guangxi, serves as a pivotal case study within the autonomous region's major restoration initiatives, aimed at addressing the ecological rehabilitation of high and steep rock slopes in limestone mines. To optimize the outcomes of ecological restoration efforts, the overall slope of the Tianluoshan limestone mine has been stratified into three distinct regions: A, B and C. The C region has been designated as the initial focus of research, with findings to be disseminated and implemented based on the results of the study. During the test, based on the vertical differentiation characteristics of the slope in area C, the area was stratified into three sections from top to bottom. A comprehensive restoration strategy, comprising "engineering slope protection, substrate improvement, and vegetation reconstruction" was proposed through an analysis of the geological and ecological attributes of the test area. Three restoration technologies were evaluated. Considering the unique geographical context of the mining area, the "ecological rod + hanging net guest soil spray seeding" technology

was selected. This was further enhanced by incorporating an appropriate seed formula tailored to the geological conditions of the mining area, resulting in a technical combination of "suitable seed formula + ecological rod + hanging net guest soil matrix spray seeding." The findings indicated that this technological combination was pivotal for comprehensive restoration. The seed formula included common pioneer species for slope ecological restoration, such as Bermuda grass, Pueraria lobata, ryegrass, and cogongrass, which are characterized by their tolerance to poor soil, strong stress resistance, and well-developed root systems. The implementation of ecological rods effectively reduces the runoff velocity on slopes, thereby contributing to sand retention and soil stabilization. The technology of spray seeding with a hanging net soil matrix involves securing the slope surface with galvanized iron wire mesh, followed by the application of an enhanced matrix comprising humus, organic fertilizer, and water-retaining agents. This process establishes stable environmental conditions conducive to plant growth. The integration of these technologies can rapidly and cost-effectively enhance vegetation coverage on slopes. Considering the variations in slope gradient and damage severity across the three test sections in the slope C area, slope classifications of 60°, 71° and 82° were established, along with an assessment of the damage morphology of the slope surface. This informed the design of differential repair techniques and spray thicknesses, leading to the development of a technical combination suitable for the ecological restoration of high and steep rock slopes in limestone mines. Monitoring the growth height of two representative plant species, thatch and pig feces, over a six-month period revealed that both species exhibited strong adaptability across all test sections, with continuous increases in growth height observed. The vegetation coverage rate achieved the anticipated target in the short term, resulting in the formation of a preliminarily stable plant community. The Pearson correlation coefficient analysis was employed to examine the strong correlation between temperature, rainfall, and plant growth efficiency, thereby confirming the adaptability of the ecological restoration technology combination utilized in this study within the limestone region. Given the favorable outcomes of the experiment, this technological combination is being applied to the ecological restoration of the high and steep rock slopes throughout the Tianluoshan limestone mine. The findings of this study offer valuable reference and guidance for the ecological restoration of high-steep rocky slopes with analogous geological conditions.

Key words: limestone mines; high steep rock slope; ecological restoration; suitable combinations of plant seeds; Guangxi